第 50 卷 第 1 期：74-82　　高电压技术　　Vol.50, No.1: 74-82
2024 年 1 月 31 日　　High Voltage Engineering　　January 31, 2024
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20230816

含高渗透率光伏配电网的集群划分电压控制策略

葛津铭[1]，刘英儒[1]，庞　丹[2]，王朝斌[1]，王振浩[1]，刘志文[1]
（1. 现代电力系统仿真控制与绿色电能新技术教育部重点实验室(东北电力大学)，吉林 132012;
2. 国网长春供电公司，长春 130021）

摘　要：分布式光伏大规模分散接入导致配电网电压越限问题频繁出现，针对集中控制无法快速响应分布式光伏随机性、就地控制难以实现整体协调的问题，该文提出了一种改进社区算法的分布式光伏集群协同优化电压控制策略。首先，通过改进社区算法，实现了综合考虑功率平衡和节点耦合程度的无功、有功集群划分；然后，充分利用光伏逆变器功率控制能力，提出集群协调电压控制策略；最后，提出电压调节能力的评价指标，对集群内节点调节能力进行评估并选取关键节点，有效减少了控制节点的数目。通过对改进的 IEEE 69 配电网进行仿真分析可知，所提的电压控制策略能缓解高渗透率分布式光伏接入配网的电压越限问题，提高了光伏的消纳能力。
关键词：高渗透率分布式光伏；配电网；集群划分；关键节点；电压调节

Cluster Division Voltage Control Strategy of Photovoltaic Distribution Network with High Permeability

GE Jinming[1], LIU Yingru[1], PANG Dan[2], WANG Chaobin[1], WANG Zhenhao[1], LIU Zhiwen[1]
(1. Key Laboratory of Modern Power System Simulation and Control & Renewable Energy Technology, Ministry of Education, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China;
2. State Grid Changchun Power Supply Company, Changchun 130021, China)

Abstract：The large-scale distributed access of distributed photovoltaic leads to frequent voltage over-limit problems in the distribution network. Aiming at the problem that centralized control cannot quickly respond to the randomness of distributed photovoltaic and local control is difficult to achieve overall coordination, this paper proposes a distributed photovoltaic cluster collaborative optimization voltage control strategy based on improved community algorithm. Firstly, by improving the community algorithm, the division of reactive and active clusters considering power balance and node coupling degree is realized. Then, the power control ability of photovoltaic inverters is fully utilized, and the cluster coordinated voltage control strategy is proposed. Finally, an evaluation index of voltage regulation ability is proposed to evaluate the node regulation ability in the cluster and select the key nodes, which effectively reduces the number of control nodes. Through the simulation analysis of the improved IEEE 69 distribution network, the results show that the voltage control strategy proposed in this paper can alleviate the voltage over-limit problem of high-permeability distributed photovoltaic access distribution and improve the photovoltaic consumption capacity.
Key words：high permeability distributed photovoltaic; distribution network; cluster division; key nodes; voltage regulation

0　引言

随着“碳达峰、碳中和”目标的提出，我国电力系统的能源消耗开始从以化石能源为主向以清洁能源为主转变[1]。随着国家光伏扶贫政策的进一步实施，配电网户用光伏并网数量和容量已经呈现出快速增长的趋势，局部地区的分布式光伏渗透过高出现功率倒送的情况，使传统无源配电网转化为复杂多源配电网，配电网频繁出现电压越限、谐波污染等多种风险[2]。其中电压越限会对线路安全稳定运行、配电网新能源消纳等方面产生影响。

国内外学者对高渗透率光伏接入配电网导致电压越限问题进行了大量研究。文献[3]通过调节有载调压变压器分接头，缓解了光伏系统高渗透率引起的电压问题。文献[4]基于逆变器的无功调节能

基金资助项目：国网吉林省电力公司科技项目(SGTYHT/21-JS-223)。
Project supported by Science and Technology Project of State Grid Jilin Electric Power Company(SGTYHT/21-JS-223).

力，提出了过电压抑制、欠电压抑制以及网损和功率因数的优化 3 种控制模式，有效地抑制了网络的电压越限问题，同时使网络损耗和功率因数也得到优化。文献[5]提出了光伏电站逆变器电压控制策略和逆变器有功/无功功率调整量的计算方法，较好地解决了光伏电站接入点的电压越限问题。文献[6]基于一致性理论，提出了无功补偿量按光伏容量比分摊的策略，缓解了高渗透率分布式光伏接入导致电压越限的问题。文献[7]提出了含分布式光伏的配电网电压就地控制策略，通过对光伏系统的无功协调和有功优化进行缩减实现了电压的低成本快速控制。文献[8]对于高比例分布式光伏接入导致的电压问题采用集中控制的方法，对于所有的分布式光伏采用等比例的无功补偿和有功缩减，极大程度地改善了系统电压。上述文献在解决配电网接入高渗透率光伏导致电压越限问题时，大多采用集中控制方法或者就地电压控制方法，虽然都能缓解由于高渗透率光伏接入产生电压越限的情况。但是，采用集中控制方法需要控制节点数量比较多，不利于电压的快速控制，还会带来额外的网损；就地电压控制会导致部分节点有功削减过多。电压集群控制能有效减少控制光伏节点的数量，降低功率流动带来的额外网损，同时还能减少分布式光伏的弃光率。

配电网集群是把配电网分为若干个集群，每个集群内部节点具有强耦合性，不同集群间具有弱耦合性，在集群内部进行功率调整时，电压变化程度较大；在其他集群进行电压控制时，本集群电压几乎没有波动。电网进行集群划分的方法大致分为聚类分析、优化算法和复杂社区发现等方法。文献[9]通过模糊聚类方法和传递闭包法进行配电网的无功分区，不仅提高了计算的速度，还能够保证系统各集群之间的弱耦合性和集群内的强耦合性。文献[10]针对分布式光伏接入配电网的情况，提出了一种改进聚类的分区方法，减少不同类型节点对分区的影响，提高了分区的准确性。文献[11]提出一种改进粒子群的配电网集群划分方法，通过集群内无功协调电压控制，有效地缓解了电压越限的问题。文献[12]针对高渗透率分布式电源的配电网电压越限问题，利用遗传算法进行无功集群划分，随后进行区集群的无功协调控制，不仅实现了电压的控制，还降低了系统的网络损耗。文献[13]利用复杂网络理论中的社区网络挖掘方法对配电网进行无功集群划分，兼顾了电网的拓扑与运行结构。文献[14]对高渗透率分布式光伏接入配电网产生的过电压问题，通过网络快速集群算法对配电网进行无功集群划分，提出集群内和集群之间无功协调配合策略，解决了配电网电压越限的问题。上述文献在系统集群划分方面均取得一定的效果，但是，通过聚类分析进行集群划分时，需要提前指定聚类中心和集群个数，集群划分结果极易受到人为因素的影响；利用优化算法进行集群划分时，其不同的编码方式让分区结果产生很大的差异；在利用复杂社区算法进行集群划分时，考虑因素不全面也会对集群划分结果产生影响。

综上所述，本文针对配电网中接入高渗透率分布式光伏产生的电压越限问题，提出了一种改进社区算法的分布式光伏集群协同优化电压控制策略。首先，利用分布式光伏无功/有功支撑能力和无功灵敏度矩阵/有功灵敏度矩阵，形成改进的权重矩阵，结合集群内节点耦合度指标，通过社区算法得到最优的无功集群和有功集群的划分结果；然后提出先无功后有功的集群电压控制策略，通过自身集群和不同集群的相互配合，解决电压越限问题；最后，针对集群内不同节点的影响能力，确定集群关键节点选取指标，缩短控制时间。通过对改进的 IEEE 69 节点配电网进行仿真分析，其结果显示，所提方法不仅能在集群内实现电压控制，还能在紧急情况下实现集群间电压的协调控制，减少控制设备的数量，降低网络损耗，有效缓解电压越限的问题。

1　无功和有功解耦集群划分

对高压电网进行电压控制时，由于电网中电抗远大于电阻，通常忽略有功功率波动对系统电压的影响，只考虑无功功率流动对系统电压的影响。但在中低压配电网中，由于电阻和电抗相差不大，有功功率变化对电压的影响不可忽略。

1.1　无功/有功电压解耦控制

由电力系统负载潮流雅可比矩阵可知，配电网中的潮流计算[15]可表示为：

$$\begin{bmatrix}\Delta \boldsymbol{P}\\ \Delta \boldsymbol{Q}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{J}_{\mathrm{P}\theta} & \boldsymbol{J}_{\mathrm{PU}}\\ \boldsymbol{J}_{\mathrm{Q}\theta} & \boldsymbol{J}_{\mathrm{QU}}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\Delta \boldsymbol{\theta}\\ \Delta \boldsymbol{U}\end{bmatrix} \tag{1}$$

式中：$\Delta \boldsymbol{P}$ 和$\Delta \boldsymbol{Q}$ 分别为节点的注入有功功率和无功功率的变化量；$\Delta \boldsymbol{\theta}$ 和$\Delta \boldsymbol{U}$ 分别为节点的相角和电压的变化量；$\boldsymbol{J}_{\mathrm{P}\theta}$、$\boldsymbol{J}_{\mathrm{PU}}$、$\boldsymbol{J}_{\mathrm{Q}\theta}$ 和 $\boldsymbol{J}_{\mathrm{QU}}$ 为雅可比矩阵中的子块。

式(1)经过改写后可表示为：

$$\begin{bmatrix}\Delta\boldsymbol{\theta}\\ \Delta\boldsymbol{U}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{S}_{\mathrm{P\theta}} & \boldsymbol{S}_{\mathrm{Q\theta}}\\ \boldsymbol{S}_{\mathrm{PU}} & \boldsymbol{S}_{\mathrm{QU}}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\Delta\boldsymbol{P}\\ \Delta\boldsymbol{Q}\end{bmatrix} \tag{2}$$

式中：$\boldsymbol{S}_{\mathrm{PU}}$ 和 $\boldsymbol{S}_{\mathrm{QU}}$ 分别为节点注入单位量的有功无功功率和无功功率时节点电压幅值的变化程度；$\boldsymbol{S}_{\mathrm{P\theta}}$ 和 $\boldsymbol{S}_{\mathrm{Q\theta}}$ 分别为节点注入单位数量的有功无功功率和无功功率时节点相角的变化程度。

由式(2)可知在 n 个节点的配电网中，i 节点的电压幅值的变化量$\Delta\boldsymbol{U}$与有功、无功变化量$\Delta\boldsymbol{P}$、$\Delta\boldsymbol{Q}$可表示为：

$$\Delta\boldsymbol{U}=\boldsymbol{S}_{\mathrm{PU}}\Delta\boldsymbol{P}+\boldsymbol{S}_{\mathrm{QU}}\Delta\boldsymbol{Q} \tag{3}$$

式中：$\Delta\boldsymbol{P}=[\Delta P_1\cdots\Delta P_n]^{\mathrm{T}}$；$\Delta\boldsymbol{Q}=[\Delta Q_1\cdots\Delta Q_n]^{\mathrm{T}}$。

在配电网中 m 个节点接入不同容量光伏，对 i 节点电压的影响可表示为：

$$U_{i1}=U_{i0}+\sum_{j=1}^{m}S_{\mathrm{PU}ij}\Delta P_j+\sum_{j=1}^{m}S_{\mathrm{QU}ij}\Delta Q_j \tag{4}$$

式中：U_{i0}为 i 节点初始的电压；$S_{\mathrm{PU}ij}$为节点 i 对节点 j 的有功电压灵敏度因子；$S_{\mathrm{QU}ij}$为 i 对节点 j 的无功电压灵敏度因子。

由式(3)、(4)可知，在不改变有功功率时，改变某个节点的无功功率，电压幅值变化程度只与无功灵敏度矩阵有关；同理在不改变无功功率时，改变该节点的有功功率，电压幅值变化程度只与有功灵敏度矩阵有关，因此可以实现无功和有功解耦控制[16]。

1.2 基于 Louvain 算法的改进集群划分方法

Louvain 算法[17]是 Newman 提出的模块度函数集群算法，该算法能快速生成最优的集群划分结果，极大程度减少人为因素的干预。模块度函数可表示为：

$$\rho=\frac{1}{2m}\sum_i\sum_j(A_{ij}-\frac{k_ik_j}{2m})\delta(i,j) \tag{5}$$

式中：A_{ij}为节点 i 和节点 j 的边权重，当节点 i 和 j 直接相连时 A_{ij}=1，不直接相连时 A_{ij}=0；k_i为所有和节点 i 相连的边权重之和；k_j为所有和 j 节点相连的边权重之和；$m=(\sum_i\sum_j A_{ij})/2$为网络中所有边的权重之和；如果节点 i 和 j 在同一个集群内则 $\delta(i,j)=1$，否则 $\delta(i,j)=0$。

1.2.1 无功集群划分

在配电网中，无功电压灵敏度矩阵是反映系统电压波动的重要依据，对比是否相连的边权重，无功电压灵敏度矩阵能更精确地反映不同节点无功耦合度，用不同节点灵敏度均值代替原来的边权重矩阵，改进后的边权重可表示为：

$$\eta_{\mathrm{QU}ij}=\frac{S_{\mathrm{QU}ij}+S_{\mathrm{QU}ji}}{2} \tag{6}$$

发电机作为电力系统中的主要动态无功源，其无功备用对电压有重要的支撑作用[18]。分布式光伏可以通过调控逆变器改变其输出的无功功率，从而对系统电压起到支撑作用，不同容量的分布式光伏对其他节点电压支撑能力有差异，不仅影响集群的无功功率平衡，还会影响集群划分的结果。调整节点 i 的无功功率对节点 j 的支撑能力可表示为：

$$\alpha_{\mathrm{QU}ij}=\frac{S_{\mathrm{QU}ij}Q_{\mathrm{QU}i}}{S_{\mathrm{QU}jj}} \tag{7}$$

式中：$Q_{\mathrm{QU}i}$为节点 i 光伏逆变器可调节无功容量。

最终改进的权重矩阵可表示为：

$$A_{\mathrm{QU}ij}=\eta_{\mathrm{QU}ij}+\alpha_{\mathrm{QU}ij} \tag{8}$$

改进的模块度可表示为：

$$\rho_{\mathrm{QUa}}=\frac{1}{2m}\sum_i\sum_j(A_{\mathrm{QU}ij}-\frac{k_ik_j}{2m})\delta(i,j) \tag{9}$$

考虑集群内部结构特征，聚合度指标可表示为：

$$\rho_{\mathrm{QUb}}=\sum_{i,j=1}^{n}S_{\mathrm{QU}ij}/(m\sum_{c=1}^{m}\sum_{i,j=1}^{n}S_{\mathrm{QU}ij}) \tag{10}$$

式中：c 为当前集群的标号；m 为总的集群数量。

综合评价指标可表示为：

$$\rho_{\mathrm{QU}}=\rho_{\mathrm{QUa}}+\rho_{\mathrm{QUb}} \tag{11}$$

1.2.2 有功集群划分

有功灵敏度矩阵能准确地反映不同节点有功耦合度。所以用有功灵敏度矩阵的均值代替原来的边权重矩阵，改进后的边权重可表示为：

$$\partial_{\mathrm{PU}ij}=\frac{S_{\mathrm{PU}ij}+S_{\mathrm{PU}ji}}{2} \tag{12}$$

在大电网中，电网电压变化与无功功率变化强相关，但是在中低压配电网中，有功功率的变化也会造成电压波动。此外还应充分考虑到有功集群内有功功率就地平衡的能力，节点 i 有功功率调整对节点 j 的支撑能力可表示为：

$$\alpha_{\mathrm{PU}ij}=\frac{S_{\mathrm{PU}ij}P_{\mathrm{PU}i}}{S_{\mathrm{PU}jj}} \tag{13}$$

最终改进的边权重矩阵可表示为：

$$A_{\mathrm{PU}ij}=S_{\mathrm{PU}}+\alpha_{\mathrm{PU}ij} \tag{14}$$

模块度可表示为：

$$\rho_{\mathrm{PUa}}=\frac{1}{2m}\sum_i\sum_j(A_{\mathrm{PU}ij}-\frac{k_ik_j}{2m})\delta(i,j) \tag{15}$$

最后还需要考虑有功集群的聚合度指标为：

$$\rho_{\mathrm{PUb}}=\sum_{i,j=1}^{n}S_{\mathrm{PU}ij}/\sum_{c=1}^{m}\sum_{i,j=1}^{n}S_{\mathrm{PU}ij} \tag{16}$$

综合模块度评价指标可表示为：

$$\rho_{\mathrm{PU}}=\rho_{\mathrm{PUa}}+\rho_{\mathrm{PUb}} \tag{17}$$

1.3　整体集群划分流程

以无功集群划分为例来说明如何在配电网中通过改进社区算法得到最佳集群划分结果。具体步骤为：

(1) 获取配电网相关数据，把网络中每个节点视为一个集群，按照式(11)计算网络模块度值 ρ_0。

(2) 初始节点 i 开始随机选取节点 j 进行结合得到新集群，并计算模块度 ρ_1，计算网络模块度增量，若模块度增量为正，则把节点 i 和节点 j 视为同一个集群。

(3) 把当前集群视作一个新的集群与其他集群继续结合，重复进行步骤(2)，在遍历整个配电网的所有节点后，第 1 次集群划分结束。

(4) 判断整个系统中是否有节点个数为 1 的集群，如果有，则该集群重复进行步骤(2)和步骤(3)；如果没有，则集群划分阶段结束，输出当前集群划分的结果。

2　集群的电压协调控制

应对高渗透率分布式光伏接入的配电网出现电压越限问题，信息处理中心按照收集的节点电压越限信息把整个配电网划分为多个集群。

现选取几个典型集群详细阐述本文所提的控制策略，集群电压协调控制策略如图 1 所示，当发生电压波动时，系统内集群可分为 3 类：集群Ⅰ，节点电压正常且协调能力充足；集群Ⅱ，部分节点电压越限且集群协调能力充足；集群Ⅲ，大部分节点电压越限且集群协调能力不足。

集群Ⅰ在光伏出力波动时，电压维持正常水平，分布式光伏继续以正常模式工作。集群Ⅱ在光伏出力波动时，出现部分节点电压越限的情况，信息处理中心给集群Ⅱ发送动作信号，经过关键节点补偿后集群整体电压水平恢复正常。集群Ⅲ在光伏出力波动时，出现部分节点电压严重越限的情况，信息处理中心给集群Ⅲ发送动作信号，经过集群Ⅲ内无功补偿后，电压仍处于越限状态，则选择对集群Ⅲ电压变化更加灵敏的集群Ⅰ进行无功补偿，集群Ⅰ动作后集群Ⅲ还是处于电压越限状态，信息处理中心给集群Ⅱ发送动作信号，补偿步骤与集群Ⅰ内部协调控制相同。

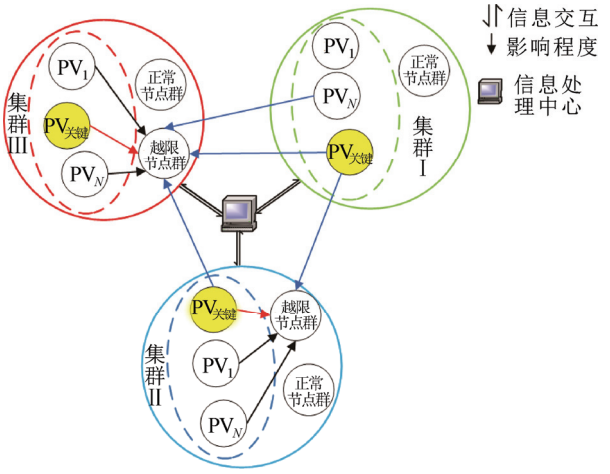


图 1　集群电压协调控制策略

Fig.1　Cluster voltage coordination control strategy

当所有集群不存在可调节的无功功率时，进入有功集群协调阶段，有功集群协调控制与无功集群协调控制方式基本相同，集群电压协调控制不仅能充分利用系统调节能力，还能减少控制节点的数量，提高电压控制效率，减少系统网络损耗。

2.1　无功集群关键节点的选取

集群内关键节点的选择需要具备可观性和可控性：一方面关键节点电压能够反映集群内普遍的电压水平，具有可观性；另一方面对关键节点的电压控制能有效影响集群整体电压水平而对邻近集群影响较小，具有可控性。

考虑到其可观性，集群关键节点选择基于电压无功灵敏度矩阵，节点可观性指标可表示为：

$$\omega_i=\sum_{j=1}^{N}S_{\mathrm{QU}ij}/((N-1)\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{N}S_{\mathrm{QU}ij}) \tag{18}$$

式中：i 为集群内节点标号；j 为节点编号；N 为本集群的节点总数；n 为集群的个数。

考虑到不同分布式光伏的无功可调节量对其他节点电压的影响程度，节点可控性指标可表示为：

$$\sigma_i=\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n}S_{\mathrm{QU}ij}Q_i/(m\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{N}S_{\mathrm{QU}ij}) \tag{19}$$

式中：i 为集群内具有无功调节能力的节点标号；j 为集群内节点编号；m 为本集群具有无功调节能力的节点总数；Q_i 为 i 节点可调节的有功量。

关键节点选取的综合评价指标可表示为：

$$\partial=\max((1-K_1)\omega+K_1\sigma) \tag{20}$$

式中：K_1 为权重系数，选取关键节点主要为了控制电压，故 K_1=1。

2.2 无功集群内的电压控制

对于如图 1 所示的越限集群Ⅰ和Ⅱ，各集群的关键节点先行动作，记录越限节点 b 的电压与电压限值 c 的差值ΔU_1；越限节点电压恢复正常所需要的无功调整量可表示为：

$$Q_c = \Delta U_1 / S_{\mathrm{QU}ab} \tag{21}$$

设 Q_a 为关键节点可调节的最大无功功率调整量，如果 $Q_c<Q_a$，由关键节点提供 Q_c 电压恢复正常；如果 $Q_a<Q_c$，由关键节点提供 Q_a，进行一次潮流计算，记录越限节点电压与 c 的差值ΔU_2 以及关键节点补偿的网损，按照选取关键节点排序记录重复进行无功协调控制，当本集群内没有无功功率调整量时，进入集群间无功协调阶段。

2.3 不同集群的电压协调控制

其他集群内不同光伏接入点对于本集群越限节点电压影响能力不同，通过式(19)可以对越限节点电压支撑能力进行评估，记录评估结果。首先选取支撑能力最大的节点，由式(21)计算电压恢复正常所需要的无功功率调整量，如果所需要的无功功率小于当前节点能提供的无功功率，则对改节点进行无功补偿后，越限节点电压恢复正常；如果所需要的无功功率大于当前节点能提供的无功功率，则该节点提供全部的无功功率，进行潮流计算并记录当前电压与正常电压差值，按照影响能力结果依次进行补偿。

全部集群可调节的无功功率不足时，进入有功集群控制阶段。有功集群的控制方式与无功集群的控制步骤相同，不再重复叙述。

3 算例分析

3.1 参数设置

本文以 IEEE 69 节点配电网为例，对所提出的高渗透率分布式光伏的配电网集群电压控制策略的有效性进行验证。系统基准容量 S_{base}=10 MVA，系统基准电压 U_{base}=12.66 kV。系统中含有 69 个节点，光伏接入节点为 15、20、25、34、45、49、57、61、65、67，接入容量分别为 0.8、1.2、0.8、0.53、0.46、0.32、0.8、0.53、1.2、0.8 MVA，设定的最小功率因数为 0.95[19]；储能电池安装在节点 20 和节点 65，安装容量为 0.15 MW，储能电池荷电状态为[0.15, 0.85]；设定正常电压水平为[0.9, 1.07]。选择七月份光照强度最大的一天，配电网中包括居民和商业的日负荷曲线符合七月份的居民负荷、商业负荷和工业负荷需求[20]，系统总负荷和光伏总有功输出功率一天 24 h 的变化情况如图 2 所示，分布式光伏和负荷的全天出力基准值分别为各自全天出力最大值。

3.2 集群电压协调控制

光照强度从 05:30 开始持续增强直到 12:30 光照达到最强，然后开始逐渐减弱，系统电压波动情况与之类似，在 10:30—15:00 时出现不同程度电压越限情况，接入光伏后全天系统电压波动如图 3 所示，在 12:30 时部分节点电压甚至达到 1.083(p.u.)，整体电压变化趋势与文献[7]相同。

经过本文所提方法进行集群划分后的结果如图 4 所示，整个系统分最优的无功集群数量为 6，模块度最大值为 0.755，整个系统分最优的有功集群数量为 5，模块度最大值为 0.81。

不同集群内的关键节点如表 1 所示，其中无功集群Ⅴ接入多个光伏，位于配电网末端节点 25 电压灵敏度因子最大，但是节点 20 可调节无功容量更多，节点 20 对本集群的电压影响能力更大，最终节

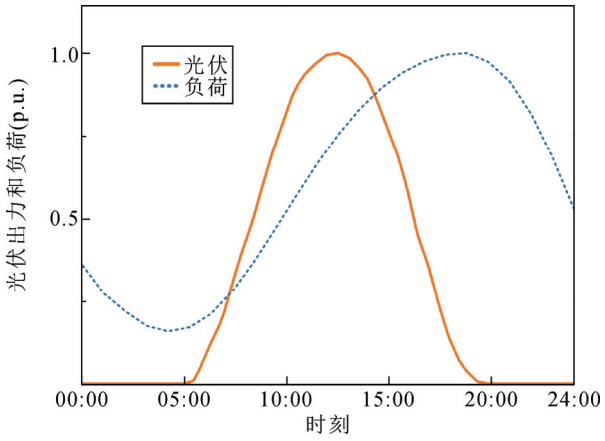


图 2 系统总光伏出力和负荷曲线

Fig.2 Daily curves of total PV generation and load

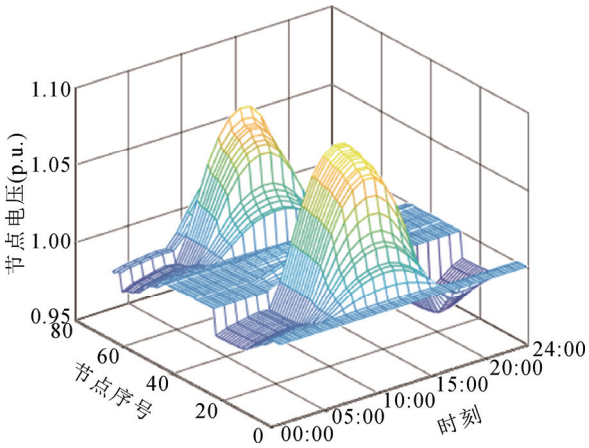


图 3 光伏接入后电压波动情况

Fig.3 Voltage fluctuations after photovoltaic access

点 20 为集群Ⅴ的关键节点。

如图 5 所示，在 14:00—15:00 之间的某一个时刻，因为分布式光伏的出力导致系统出现越限情况，集群Ⅵ的节点 23 到节点 28 出现电压越限的情况，分别按照集群内就地补偿策略和集群内关键节点补偿策略进行补偿，通过图 4 的曲线对比情况可以得知集群内关键节点补偿策略优于集群内就地补偿策略，且采用关键节点控制的网损比采用就地控制的网损减少了 10.3%，随着光伏安装容量及控制数量的增加，这种差异还会进一步扩大，因此集群内选取关键节点是有必要的。

分布式光伏的出力较小会导致电压轻微越限，通过对本集群部分节点进行无功补偿可以解决电压越限的问题。在 14:00—15:00 时段，配电网中出现部分节点轻微越限，集群Ⅴ内的关键节点 20 补偿 0.34 kVar，集群内电压越限节点数量减少了 57.1%，按照关键节点选取计算的结果，集群内节点 25 补偿 0.23 kVar，所有节点电压都恢复正常。

随着分布式光伏出力提高，仅依靠集群内部的无功协调不能满足调压要求，需要不同集群的无功协调控制才能解决电压越限的问题。在 10:00—11:00 时段，配电网电压越限节点数量更多，对集群Ⅴ内部节点进行无功补偿后电压还是越限，进入不同集群的协调阶段。集群Ⅳ和集群Ⅵ的关键节点进行补偿后集群Ⅴ中所有节点电压都恢复正常。

在光伏接近满发时，仅依靠无功集群协调不能满足调压要求，对有功集群中个别节点控制解决电压越限的问题。在 11:00—12:00 时段，分布式光伏接近满发，配电电压越限节点比例持续增加，集群Ⅵ的关键节点 65 补偿后集群内电压全部恢复正常；集群Ⅴ内关键节点和其他具有无功补偿能力的节点全部补偿后，本电压还是处于越限状态，进入不同集群的无功协调阶段，集群Ⅳ和集群Ⅵ补偿全部无功功率，集群Ⅴ存在电压越限节点，集群Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ进行无功补偿后电压没有变化，于是进入有功集群控制阶段，有功集群Ⅳ内的关键节点 20 削减部分有功后电压全部恢复正常。

如图 6 所示，随着光伏渗透率的提高，整个配电的节点电压也随之提升，曲线 e 表示分布式光伏渗透率为 110%时配电网的电压情况，配电网没出现电压越限问题，继续正常运行；曲线 c 表示分布式光伏渗透率为 165%时配电网电压情况，配电网出现部分节点电压越限问题，经过集群内无功协调

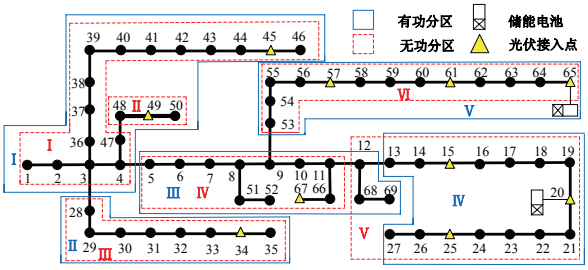


图 4　有功无功集群图

Fig.4　Active and reactive power partition diagram

表 1　无功集群和有功集群的关键节点

Table 1　Key nodes for reactive and active partitions

集群编号	无功集群节点编号	有功集群节点编号
集群Ⅰ	45	45
集群Ⅱ	49	34
集群Ⅲ	34	67
集群Ⅳ	67	65
集群Ⅴ	20	20
集群Ⅵ	65	无

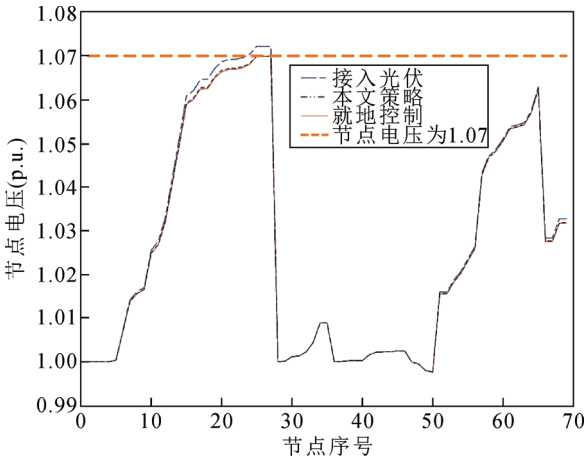


图 5　不同策略电压调节

Fig.5　Different strategies for voltage regulation

后电压恢复正常，如曲线 d 所示；曲线 a 表示分布式光伏渗透率为 221%时配电网电压情况，配电网中出现部分节点电压严重越限问题，仅靠无功集群协调配合不能满足电压调节的需求，还需要有功集群控制，最终电压恢复正常，如曲线 b 所示。

3.3　不同控制策略对比

3.3.1　无功集群内的电压控制

为了验证所提基于 Louvain 算法改进的集群划分方法的优越性，分别应用 Fast Newman 集群划分算法、文献[14]提出的算法和本文所提算法对配电

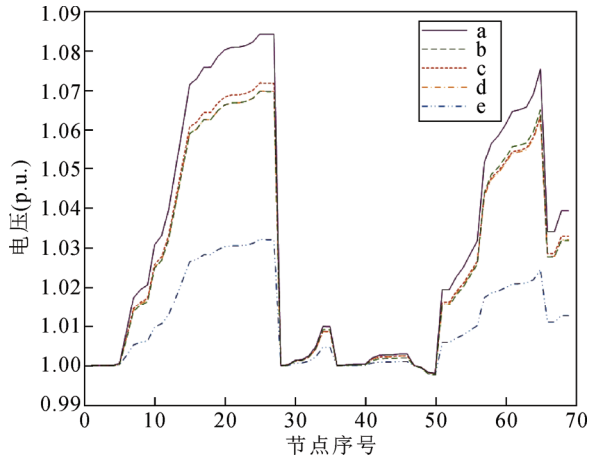


图 6 不同渗透率下的电压控制

Fig.6 Voltage control of different permeability

网系统进行集群划分，模块度对比情况如表 2 所示。模块度可以衡量集群划分结果是否合理，从表 2 的集群划分结果可以看出，对于 Fast Newman 集群划分算法，本文通过考虑耦合度的关系，一定程度上减少了个别集群节点个数较少的问题，提高了集群划分的准确性。对于文献[14]所提出的功率平衡度指标，本文把光伏支撑能力与灵敏度矩阵相结合，避免了集群内可调节分布式光伏过多的情况，本文不仅考虑了无功灵敏度矩阵，还考虑到分布式光伏对电压的影响以及集群的耦合度关系，集群划分更加合理，因此无功集群模块度值更高。

3.3.2 不同方法的调压效果对比

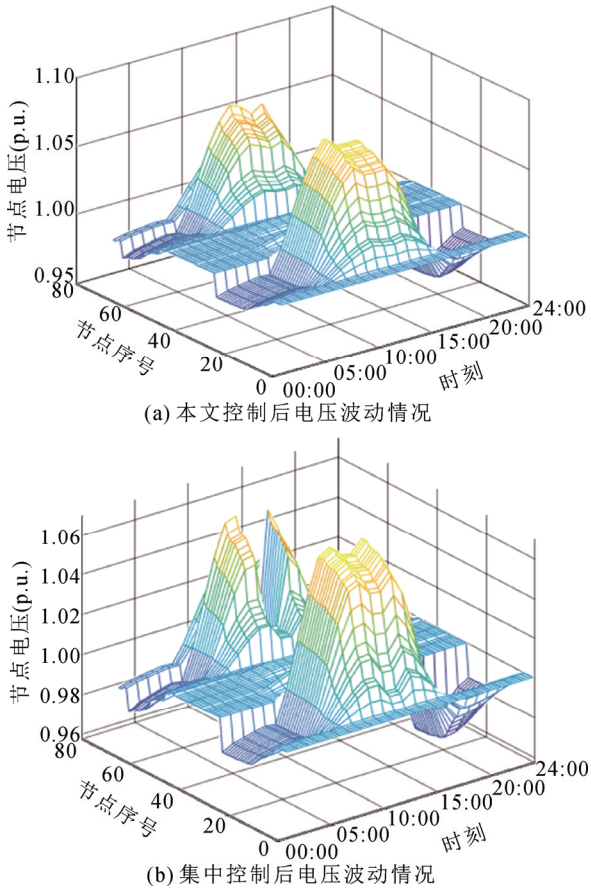
为了验证本文策略的优越性，在高渗透率光伏接入配电网时，使用集中控制方式来进行电压控制，并将其与本文所提出的集群控制方式进行比较和分析。全天接入分布式光伏后系统电压波动情况如图 3 所示，由于分布式光伏出力波动性，部分时刻出现电压越限；经过本文控制策略后全天电压波动情况如图 7(a)所示；全天经过集中控制后电压波动情况如图 7(b)所示。虽然集中控制和本文控制都起到维持正常电压的效果，但是本文控制策略中电压波动更小，有利于电力系统的稳定运行。

整个控制过程中的无功补偿和有功缩减如表 3 所示，集中控制的无功改变量比集群控制增加了 13%；比集群控制多消纳光伏 0.11 MW，但需要动作的设备数量过多，主要原因是在集中控制时，所有的光伏节点都参与电压调节，产生更多的无功补偿，在有功缩减阶段，虽然整体的有功减少量不大，但是大部分节点有功减少比例达到极限，本文集群

表 2 不同算无功集群划分结果比较

Table 2 Comparison of reactive power cluster division results of different calculations

算法	集群数	模块度
Fast Newman 算法	7	0.671
文献[14]算法	7	0.730
本文算法	6	0.754



(a) 本文控制后电压波动情况

(b) 集中控制后电压波动情况

图 7 不同情况下的电压对比图

Fig.7 Voltage comparison chart for different situations

表 3 不同控制方式的对比

Table 3 Comparison of different control methods

控制方式	无功吸收/MW	有功减少/MW	网损/MW
集中控制	0.1413	0.2634	0.3936
集群控制	0.1250	0.3567	0.1254

电压控制策略能有效解决电压越限问题，削弱系统电压波动程度。

4 结论

针对配电网中接入高渗透率分布式光伏产生的电压越限问题。本文提出了一种改进社区算法的分布式光伏集群协同优化电压控制策略，得到如下

结论：

1）基于改进的社区算法进行高渗透率分布式光伏接入配电网的集群划分。从有功和无功灵敏度关系出发，考虑到改变当前节点有功/无功功率对其他节点的影响力，还结合集群内节点耦合度指标，经过社区算法得到最优的无功集群和有功集群划分结果，无功模块度和有功模块度比未曾改进时分别提升了 12.3%和 18.8%。

2）集群的关键节点选取能提高控制效率。进行集群的关键节点选择，能减少控制节点数目，可以在量测装置不足的情况下改善电压控制效果，提高电压控制的效率。

3）通过集群电压协调控制能有效解决电压越限问题。首先进行集群内关键节点补偿，再进行集群内其节点补偿，最后进行集群之间协调控制策略，有利于功率就地平衡，有效解决电压越限问题。

接下来工作重点是在本文基础上考虑配电网不同联络开关的开断对集群划分的影响，进一步提高电压控制的效率和光伏的消纳能力。

参考文献　References

[1] 董旭柱，华祝虎，尚　磊，等. 新型配电系统形态特征与技术展望[J]. 高电压技术，2021，47(9)：3021-3035.
DONG Xuzhu, HUA Zhuhu, SHANG Lei, et al. Morphological characteristics and technology prospect of new distribution system[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(9): 3021-3035.

[2] 韩肖清，李廷钧，张东霞，等. 双碳目标下的新型电力系统规划新问题及关键技术[J]. 高电压技术，2021，47(9)：3036-3046.
HAN Xiaoqing, LI Tingjun, ZHANG Dongxia, et al. New issues and key technologies of new power system planning under double carbon goals[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(9): 3036-3046.

[3] SONG Z, HU Y T, GUO H Y, et al. Optimal design method for the partitioning of OLTC-inverter control parameters in distribution stations with high-proportion residential photovoltaics[C] // 2022 International Conference on Innovations and Development of Information Technologies and Robotics (IDITR). Chengdu, China: IEEE, 2022: 43-49.

[4] 蔡永翔，唐　巍，张　璐，等. 基于光伏逆变器无功调节的低压配电网多模式电压控制[J]. 电力系统自动化，2017，41(13)：133-141.
CAl Yongxiang, TANG Wei, ZHANG Lu, et al. Multi-mode voltage control in low distribution networks based on reactive power regulation of photovoltaic inverters[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(13): 133-141.

[5] 高鹏程，王　蕾，李立生，等. 基于光伏逆变器调节的配电网电压控制策略[J]. 电力自动化设备，2019，39(4)：190-196.
GAO Pengcheng, WANG Lei, LI Lisheng, et al. Voltage control strategy based on adjustment of PV inverters in distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(4): 190-196.

[6] 刘科研，盛万兴，赵鹏杰，等. 基于一致性算法的跨台区光伏分布式控制策略[J]. 高电压技术，2021，47(12)：4431-4439.
LIU Keyan, SHENG Wanxing, ZHAO Pengjie, et al. Distributed control strategy of photovoltaic cross-district based on consistency algorithm[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(12): 4431-4439.

[7] 柴园园，郭　力，王成山，等. 含高渗透率光伏的配电网分布式电压控制[J]. 电网技术，2018，42(3)：738-746.
CHAI Yuanyuan, GUO Li, WANG Chengshan, et al. Distributed voltage control in distribution networks with high penetration of PV[J]. Power System Technology, 2018, 42(3): 738-746.

[8] OLIVIER F, ARISTIDOU P, ERNST D, et al. Active management of low-voltage networks for mitigating overvoltages due to photovoltaic units[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(2): 926-936.

[9] 徐立超，杨景崙，熊泽昊. 基于改进灰色聚类法的配电网供电分区方法[J]. 电工技术，2021(13)：81-84.
XU Lichao, YANG Jingyu, XIONG Zehao. A method of power distribution network classification based on improved grey cluster[J]. Electric Engineering, 2021(13): 81-84.

[10] 刘　颖，任　惠，孙辰军，等. 基于 AP 聚类的含分布式光伏的配电网分区方法[J]. 电测与仪表，2019，56(13)：70-75.
LIU Ying, REN Hui, SUN Chenjun, et al. Distribution network partition method based on AP clustering with distributed photovoltaic[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(13): 70-75.

[11] 于　琳，孙　莹，徐　然，等. 改进粒子群优化算法及其在电网无功分区中的应用[J]. 电力系统自动化，2017，41(3)：89-95，128.
YU Lin, SUN Ying, XU Ran, et al. Improved particle swarm optimization algorithm and its application in reactive power partitioning of power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(3): 89-95, 128.

[12] 丁　明，刘先放，毕　锐，等. 采用综合性能指标的高渗透率分布式电源集群划分方法[J]. 电力系统自动化，2018，42(15)：47-52，141.
DING Ming, LIU Xianfang, BI Rui, et al. Method for cluster partition of high-penetration distributed generators based on comprehensive performance index[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(15): 47-52, 141.

[13] 魏震波，刘俊勇，程　飞，等. 利用社区挖掘的快速无功电压分区方法[J]. 中国电机工程学报，2011，31(31)：166-172.
WEI Zhenbo, LIU Junyong, CHENG Fei, et al. Fast Power network partitioning method in mvar control space based on community wining[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(31): 166-172.

[14] 李　洋. 分布式光伏接入下配电网分区与无功优化控制研究[D]. 合肥：安徽大学，2019.
LI Yang. Research on distribution network partitioning and reactive power optimization control with distributed photovoltaic integration[D]. Hefei, China: Anhui University, 2019.

[15] 王翰林，黄小红，李昊洋，等. 含分布式光伏接入的三相牵引供电系统电压协调控制方法[J/OL]. 高电压技术，2023：1-11[2023-12-14]. https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20221667.
WANG Hanlin, HUANG Xiaohong, LI Haoyang, et al. Voltage coordination control method of three-phase traction power supply system with distributed photovoltaic integration[J/OL]. High Voltage Engineering, 2023: 1-11[2023-12-14]. https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve. 20221667.

[16] 姚宏民，杜欣慧，李廷钧，等. 光伏高渗透率下配网消纳能力模拟及电压控制策略研究[J]. 电网技术，2019，43(2)：462-469.
YAO Hongmin, DU Xinhui, LI Tingjun, et al. Simulation of consumption capacity and voltage control strategy of distribution network with high penetration of photovoltaics[J]. Power System Technology, 2019, 43(2): 462-469.

[17] CHEN Y, SHEN C. A Jacobian-free Newton-GMRES(m) method with adaptive preconditioner and its application for power flow calcula-

tions[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2006, 21(3): 1096-1103.

[18] 冯艳涛，谢 震，李梦杰，等. 低短路比下双馈风力发电机组电压主动支撑的优化控制策略[J]. 高电压技术，2023，49(1)：42-50.
FENG Yantao, XIE Zhen, LI Mengjie, et al. Optimal control strategy of voltage active support for doubly fed induction generator with low short circuit ratio[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(1): 42-50.

[19] VDE. Power generation systems connected to the low-voltage distribution network—technical minimum requirements for the connection to and parallel operation with low-voltage distribution networks: VDE-AR-N 4105: 2011—08[S]. Offenbach, Germany: Verband der Elektrotechnik (VDE), 2011.

[20] 宋泽淏，冯 华，陈晓刚，等. 基于节点碳势的配电网分布式资源低碳调度策略[J]. 高电压技术，2023，49(6)：2318-2328.
SONG Zehao, FENG Hua, CHEN Xiaogang, et al. Low-carbon scheduling strategy of distributed energy resources based on node carbon intensity for distribution networks[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(6): 2318-2328.



葛津铭
1990—，男，博士，讲师，硕导
主要研究方向为新能源并网运行分析、光学电流测量技术等
E-mail: gejinming90@126.com

GE Jinming
Ph.D.



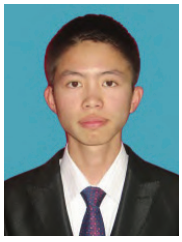
刘英儒
1996—，男，硕士生
主要研究方向为新能源并网运行分析
E-mail: 547667962@qq.com

LIU Yingru



庞 丹
1973—，男，教授级高工
主要研究方向为电力电缆运行维护与检修技术
E-mail: 13844109937@163. com

PANG Dan
Professor



王朝斌(通信作者)
1990—，男，硕士，讲师
主要研究方向为电能质量控制、柔性直流输电等
E-mail: 15948699059@163.com

WANG Chaobin
Corresponding author

收稿日期 2023-05-11 修回日期 2023-08-10 编辑 程子丰